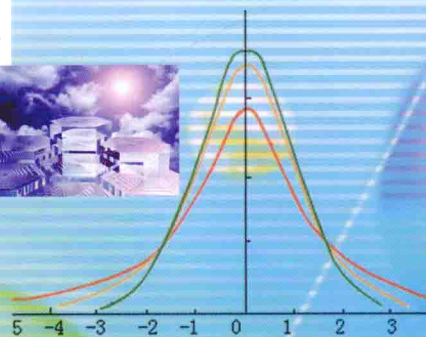
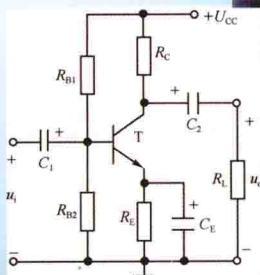


全国高等医药院校规划教材

医用电子学

主编 张延芳



科学出版社

全国高等医药院校规划教材

医用电子学

主 编 张延芳
副主编 张秀梅 陈艳霞
编 者 (以姓氏笔画为序)
王克难(辽宁医学院)
付 利(佛山科学技术学院)
刘 蔚(广州中医药大学)
张秀梅(广州医科大学)
张延芳(广东医学院)
陈艳霞(大连医科大学)
林 勤(广东医学院)
顾焕国(广州中医药大学)
彭 微(湖北科技学院)

科 学 出 版 社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本教材注重电子技术的基本概念、基本理论和分析方法,力求简明扼要,通俗易懂,图形符号采用新国标。全书共分十二章,分别为电路基础、半导体器件、基本放大电路、生物医学常用放大电路、振荡电路、直流稳压电源、数字逻辑电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、D/A 和 A/D 转换电路、医学信息检测和医学仪器安全使用。

本书可供全国高等医学院校的检验、麻醉、影像、药学等本科专业学生使用,也可作为广大教师和工作人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

医用电子学 / 张延芳主编. —北京:科学出版社,2014.4

全国高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-040389-6

I. ①医… II. ①张… III. ①医用电子学-医学院校-教材 IV. ①R312

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第070583号

责任编辑:周万灏 朱 华 / 责任校对:胡小洁

责任印制:肖 兴 / 封面设计:范璧合

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年4月第一次印刷 印张:16

字数:376 000

定价:49.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

《医用电子学》是高等医药院校的一门重要的必修专业基础课。学生通过学习这门课程,掌握电子技术的基本概念、基本理论和常用分析方法,为后续课程的学习和培养高级医药卫生人才奠定坚实的电子技术基础。

编写中注意深入浅出、循序渐进,简化理论推导过程,侧重电子技术的基本概念、基本理论和常用分析方法,强调电子技术的思想性、科学性、先进性、系统性和启发性。全书共分十二章,分别为电路基础、半导体器件、基本放大电路、生物医学常用放大电路、振荡电路、直流稳压电源、数字逻辑电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、D/A 和 A/D 转换电路、医学信息检测和医学仪器安全使用。

本书中的符号,代表物理量、变量的字母用斜体;即可代表名称又可代表物理量的字符,用斜体,如电阻 R 、电容 C ;仅代表名称的字母用正体,如二极管 D、三极管 T。

本教材由长期工作在教学第一线的骨干教师编写,广东医学院张延芳担任主编,广州医科大学张秀梅和大连医科大学陈艳霞担任副主编,第一章由付利老师编写,第二章由张秀梅老师编写,第三、四章由张延芳编写,第五章由彭微老师编写,第六章由王克难老师编写,第七、九章由张延芳和林勤老师编写,第八、十章由陈艳霞老师编写,第十一章由顾焕国老师编写,第十二章由刘蔚老师编写。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,请广大师生、同行和读者批评指正。

张延芳

2013年10月于广东医学院

目 录

前言

第一章 电路基础	(1)
1.1 电路的基本概念	(1)
1.2 电路的暂态过程	(8)
1.3 正弦交流电路	(11)
小结	(20)
习题	(20)
习题答案	(21)
第二章 半导体器件	(22)
2.1 半导体基础知识	(22)
2.2 半导体二极管	(24)
2.3 半导体三极管	(26)
2.4 场效应管	(30)
小结	(37)
习题	(38)
习题答案	(39)
第三章 基本放大电路	(41)
3.1 共发射极放大电路	(41)
3.2 共集电极放大电路和共基极放大电路	(51)
3.3 多级放大电路	(54)
3.4 场效应管放大电路	(57)
小结	(61)
习题	(61)
习题答案	(64)
第四章 生物医学常用放大电路	(65)
4.1 生物电信号的特点	(65)
4.2 直流放大电路	(65)
4.3 集成运算放大电路	(74)
4.4 负反馈放大器	(76)
4.5 集成运算放大电路的应用	(81)
4.6 功率放大电路	(90)
小结	(94)
习题	(95)
习题答案	(97)

第五章 振荡电路	(98)
5.1 正弦波振荡电路	(98)
5.2 石英晶体振荡电路	(106)
5.3 非正弦振荡电路	(108)
小结	(110)
习题	(110)
习题答案	(111)
第六章 直流稳压电源	(112)
6.1 单相整流电路	(112)
6.2 滤波电路	(115)
6.3 稳压电路	(118)
6.4 开关稳压电路	(125)
小结	(127)
习题	(128)
习题答案	(130)
第七章 数字逻辑电路基础	(131)
7.1 数字电路基础	(131)
7.2 逻辑函数	(135)
7.3 逻辑代数	(140)
7.4 逻辑函数卡诺图化简法	(141)
7.5 分立元件门电路	(145)
小结	(147)
习题	(147)
习题答案	(148)
第八章 组合逻辑电路	(150)
8.1 集成门电路	(150)
8.2 半加器和全加器	(155)
8.3 编码器和译码器	(157)
8.4 数据选择器	(161)
8.5 组合逻辑电路的分析与设计	(163)
小结	(166)
习题	(166)
习题答案	(167)
第九章 时序逻辑电路	(169)
9.1 集成触发器	(169)
9.2 寄存器	(178)
9.3 计数器	(181)
小结	(188)
习题	(189)
习题答案	(191)

第十章 D/A 和 A/D 转换电路	(193)
10.1 D/A 转换器	(193)
10.2 A/D 转换器	(197)
10.3 D/A 与 A/D 转换器的应用	(205)
小结	(206)
习题	(206)
习题答案	(207)
第十一章 医学信息检测	(208)
11.1 生物医学信号的检测	(208)
11.2 生物医学传感器	(214)
11.3 生物医学信号检测中的干扰及噪声	(219)
小结	(226)
习题	(226)
习题答案	(226)
第十二章 医学仪器安全使用	(228)
12.1 人身安全	(228)
12.2 医学仪器安全使用	(232)
小结	(237)
习题	(237)
习题答案	(237)
参考文献	(240)
附录 A 汉英专业词汇对照	(241)
附录 B 符号	(243)

示,一种是电压源,另一种是电流源.电压源和电流源是从实际电源抽象得到的电路模型.本节着重讨论理想和实际的直流独立电压源及电流源的符号表示、特点及应用.

1. 电压源 实际工程上的电源,如电池、发电机等都接近电压源.人们对电压源比较熟悉,在电源内部有外力(电池中是化学力,发电机中是电磁力),使正负电荷分别向两端积累,在内部形成电场.当外力和电场力平衡时,电荷不再增加,建立起一定的电动势和端电压,具有恒定端电压的电源就叫直流电压源.按电动势的变化规律将电压源分为直流电压源与交流电压源两种.从能量观点考虑,理想电压源(ideal voltage source)纯粹是一个供能元件,供给外电路的耗能元件的能量,是一个很大的功率源.将这个概念推广到更一般的情况,电压源是指一个二端元件,元件的电压与通过它的电流无关,电压总保持为某给定的时间函数.

任何一个电源,都含有电动势 E 和小内阻 R_0 . 电压源的表示符号如图 1-1 的虚线框所示, U_s 为电压源的恒值电压(也称空载电压,简称恒电压),与电动势 E 的大小相等,极性相反.图中 U 为电源的路端电压,当接上负载电阻 R_L 形成回路后,电路中将有电流 I 流过.则电源的端电压为:

$$U = E - IR_0 \quad (1-2)$$

式(1-2)中, E 和 R_0 值为常数. U 和 I 的关系称为电源的外特性,如图 1-2 所示.

当 $I=0$,即电压源开路时, $U=U_s=E$,开路电压等于电源的电动势.当 $U=0$,即电压源短路时, $I=I_s$, I_s 称为短路电流(也称恒电流).

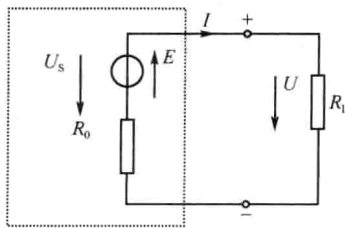


图 1-1 电压源的表示符号

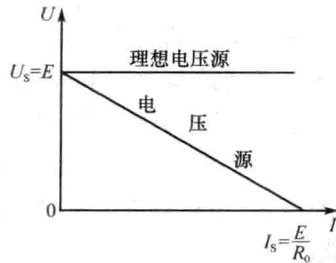


图 1-2 电压源和理想电压源的外特性曲线

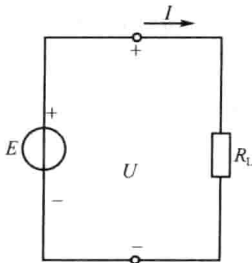


图 1-3 理想电压源

当 $R_0=0$ 时,路端电压 U 恒等于电动势 E ,是一定值,而其中的电流 I 则是任意值,由负载电阻 R_L 及电压 U 本身确定,即工作电流则随负载的变化而变化.这样的电压源称为理想电压源或恒压源(constant voltage source),恒压源的外特性为一条与横轴平行的直线,如图 1-2 所示.理想电压源电路如图 1-3 所示.

理想电压源实际上是不存在的,但在电源内阻 R_0 远小于负载电阻 R_L ,内阻上的压降 IR_0 将远小于 U ,则可认为 $U \approx E$,基本上恒定,这时可将此电压源看成是理想电压源.通常用的稳压电源可认为是一个理想电压源.

2. 电流源 电源除用电动势 E 和内阻 R_0 串联的电路模型表示外,还可以用另一种电路并联模型来表示.如将式(1-2)两端除以 R_0 ,得

$$\frac{U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - I = I_s - I$$

$$I_s = \frac{U}{R_0} + I \quad (1-3)$$

这样,我们就可以用一个电流源 I_s 和一个大内阻 R_0 并联的电路模型去表示一个电源,此即电流源。电流源模型的表示符号如图 1-4 所示及其外特性如图 1-5 所示。

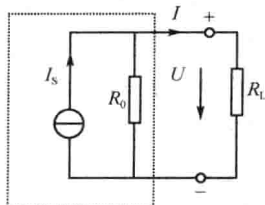


图 1-4 电流源电路

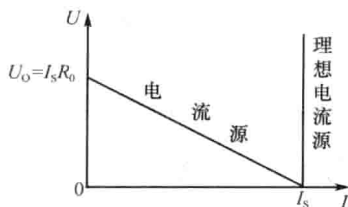


图 1-5 电流源和理想电流源的外特性

当电流源开路时, $I=0, U=U_0=I_s R_0$; 当其短路时, $U=0, I=I_s$. 内阻 R_0 越大, 则直线越陡, R_0 支路对 I_s 的影响就越小. 当 $R_0 = \infty$ (相当于 R_0 支路断开) 时, 电流 I 将恒等于 I_s , 是一定值, 而其两端的电压 U 则是任意值, 它不是由电流源本身就能确定的, 是由负载电阻 R_L 及电流 I_s 本身确定的. 这样的电源称为理想电流源 (ideal current source) 或恒流源 (constant current source). 理想电流源如图 1-6 所示.

理想电流源是不存在的, 但是在电源内阻 R_0 远大于负载电阻 R_L , 即 $R_0 \gg R_L$ 时, R_L 支路的分流作用很小, 则可认为 $I=I_s$ 基本恒定, 这时可将此电流源看成是理想电流源.

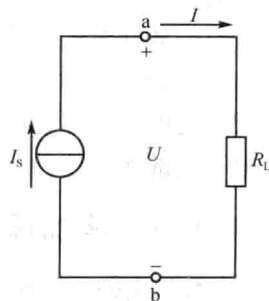


图 1-6 理想电流源

3. 电压源与恒压源、电流源与恒流源的区别和联系 电压源和电流源代表实际电源, 而恒压源和恒流源则分别为它们的理想情况, 恒压源与阻抗串联即可组成电压源, 恒流源与阻抗并联就能组成电流源. 若电压源的内阻比负载阻抗小得多, 随着负载的变化, 路端电压的变化却很小, 此时即可把电压源当作恒压源; 若电流源的内阻比负载阻抗大得多, 路端电压随负载而变化, 但电流的变化却很小, 此时即可把电流源当作恒流源. 但是, 电压源和电流源可以进行等效互换, 而恒压源和恒流源则不能互换. 并且, 恒压源不允许短路, 恒流源不允许开路, 而电压源和电流源却允许短路或开路.

理想电流源与理想电压源只是从电路中抽象出来的一种理想元件, 实际上并不存在, 但是从电路理论分析的观点上看, 引入这两个理想元件是有用的. 例如, 晶体管放大电路中的三极管, 其集电极电流基本上只受基极电流的控制而和加在集电极上的电压几乎无关. 在一定的基极电流下, 集电极电流几乎是恒定值, 对于这样的电流可以用一个受基极电流控制的电流源来表示.

4. 电压源和电流源的等效变换 在实际电源中, 其特性与电压源模型接近得较多, 而在原理上与电流源模型完全一致的物理器件还不曾被提出, 但像光电池及晶体管的特性比较接近电流源模型. 应当明确指出, 电源的这两种模型是为了便于分析问题而提出的, 它们是对同一事物外部特性的两种不同描述. 事实上任何电源都可以用这两种模型来描述其特性. 因此, 电压源模型与电流源模型是可以等效的. 其条件是具有相同的外特性.

如果一个电压源与一个电流源对同一个负载能够提供等值的电压、电流和功率, 则这两个电源对此负载是等效的. 换言之, 即如果两个电源的外特性相同, 则对任何外电路它们都是

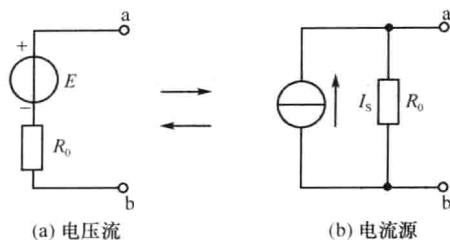


图 1-7 电压源(a)与电流源(b)的等效变换

等效的. 具有等效条件的电源互为等效电源. 在电路中用等效电源互相置换后, 不影响外电路的工作状态. 含内阻的电压源与电流源等效变换如图 1-7 所示.

两者之间进行等效变化的方法如下:

(1) 如图 1-7(a) 所示的电压源等效变化为电流源时, 电流源的电流 $I_s = U_s / R_0$, 即电压源的短路电流. I_s 流出的方向与 E 的正极相对应, 与 I_s 并联的内阻 R_0 就等于与 E 串联的内阻 R_0 , 等效变换所得的电流源如图 1-7(b) 所示.

(2) 图 1-7(b) 所示的电流源等效变换为电压源时, 电压源的电动势 $E = I_s R_0$, 即电流源的开路电压, E 的正极与 I_s 流出的方向相对应; 与 E 串联的内阻 R_0 就等于与 I_s 并联的内阻 R_0 , 等效变换所得的电压源如图 1-7(a) 所示.

但是, 要注意的是电压源和电流源的等效关系只是对外电路而言的, 对电源内部是不等效的. 如图 1-7 所示, 当电流源开路时, 电源内部有损耗, I_s 流过 R_0 产生损耗, 而当电流源短路时, 电源内部无损耗, R_0 无电流流过. 而对于电压源, 当电压源开路时, R_0 无电流通过, 电源内部无损耗, 而当电压源短路时, R_0 中有电流 I_s 流过, 在电源内部产生损耗.

1.1.3 叠加原理

1. 叠加定理 叠加原理 (superposition theorem) 是分析线性电路的最基本方法之一, 是线性电路普遍适用的一个基本定理, 它是线性电路“齐次性”和“可加性”的体现. 其内容为: 任一线性电路中任一支路的电流或电压等于电路中各个独立电源单独作用时在这个支路所产生的电流或电压的代数和. 所谓线性电路, 是指由非时变线性无源元件、线性受控源和独立电源组成的电路. 线性电路有许多电路定理可由它导出, 利用它还可以把多电源作用的复杂电路的计算问题, 转化为单电源作用的简单电路的计算问题.

该定理一般用在分析计算含有两个或两个以上电源的线性直流电路时, 只需求解一条支路的电压或电流的情况. 先分析线性直流电路, 对电路每个电源的作用, 再分别应用基尔霍夫定律进行求解, 而后叠加.

在应用叠加原理时, 要注意以下几点:

(1) 分别作出一个电源单独作用的分图, 当某一个电源单独作用时, 其余电源则“不作用”. 对“不作用”的其余电源, 凡是电压源, 应令其电动势 E 为零, 将电压源短路; 凡是电流源, 应令其 I_s 为零, 将电流源开路, 但是其余电源要保留其内阻.

(2) 按电阻串、并联的计算方法, 分别计算出分图中每一支路中电流或电压分量的大小和方向. 注意, 如原电路中各支路电流的参考方向确定后, 在求各分电流的代数和时, 各支路中分电流的参考方向与原电路中对应支路电流的参考方向一致者, 取正值; 相反者, 取负值.

(3) 求出各电动势在每个支路中产生电流或电压的代数和.

(4) 叠加原理只适用线性电路, 而不能用于分析非线性电路.

【例 1-1】 如图 1-8(a) 所示, 试求电流 I .

解: 由叠加定理将图 1-8(a) 中的电流等效为如图 1-8(b)、图 1-8(c) 两图中电流的叠加.

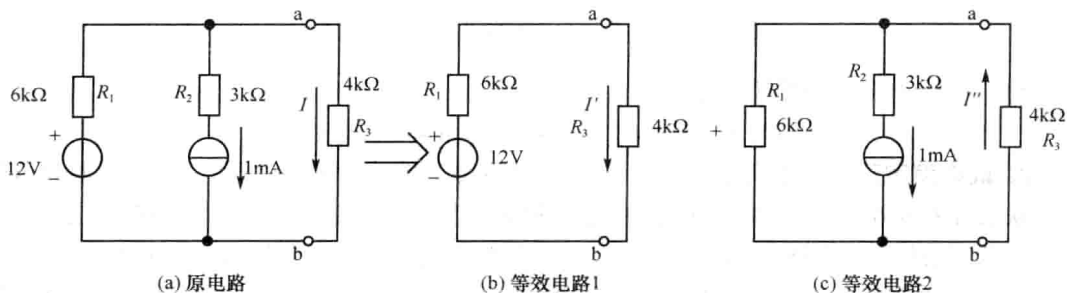


图 1-8 例 1-1

图 1-8(b) 中, 由闭合电路的欧姆定律:

$$I' = \frac{U_s}{R_1 + R_3} = \frac{12}{6 + 4} = 1.2(\text{mA})$$

电流方向由 a 指向 b.

图 1-8(c) 中, 由并联电流分配的性质:

$$I'' = \frac{R_1}{R_1 + R_3} I_s = \frac{12}{6 + 4} \times 1 = 0.6(\text{mA})$$

电流方向由 b 指向 a.

故所求电流:

$$I = I' + I'' = 1.2 - 0.6 = 0.6(\text{mA})$$

叠加时注意点: 根据电流的参考方向, 确定各分量的正、负号.

【例 1-2】 用叠加原理求图 1-9(a) 中的 U_{ab} .

解: 先把图 1-9(a) 分解成图 1-9(b) 和图 1-9(c) 所示的电源单独作用的电路, 然后按下列步骤计算.

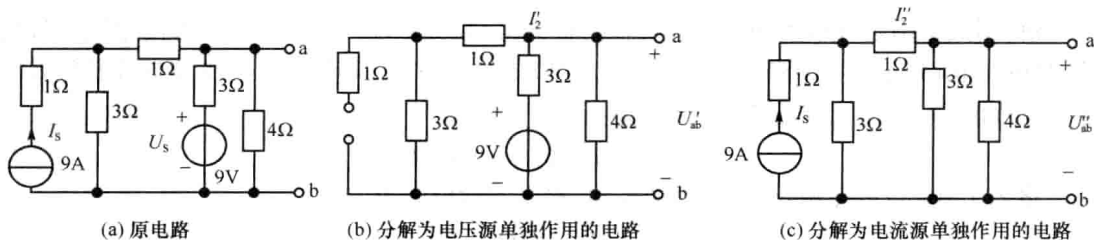


图 1-9 例 1-2

1) 如图 1-9(b) 所示, 当电压源单独作用时:

$$U'_{ab} = \frac{\frac{(1+3) \times 4}{1+3+4}}{\frac{(1+3) \times 4}{1+3+4} + 3} \times 9 = 3.6(\text{V})$$

2) 如图 1-9(c) 所示, 当电流源单独作用时:

$$I''_2 = \frac{3}{\frac{3 \times 4}{3 + 4} + 1 + 3} \times I_s = 0.7 \times 9 = 6.3(\text{A})$$

$$U''_{ab} = \frac{3 \times 4}{3 + 4} I''_2 = \frac{12}{7} \times 6.3 = 10.8(\text{V})$$

3) 当两个电源共同作用时:

$$U_{ab} = U'_{ab} + U''_{ab} = 3.6 + 10.8 = 14.4(\text{V})$$

2. 戴维南定理 戴维南定理的内容为,任何有源二端线性网络,可用一个电压源和电阻的串联组合来等效替代,其中等效电源的电动势 E 就是有源二端网络的端口开路电压,电阻 R 等于二端网络化成为无源网络(电压源短路,电流源断开)后,从两端看进去的等效电阻。

戴维南定理所要解决的基本问题,是求解有源二端网络输出的全电路电流 I ,这是应用基尔霍夫两个定律就能解决的问题,而运用戴维南定理求解这个问题则为新方法,是先将有源二端网络等效变换为电压源或电流源,然后求解,本质是将一个实际问题化解为两个较简单的问题,然后循序求解。具体步骤为:

- (1) 断开待求支路,电路剩余部分为线性有源二端网络。
- (2) 计算开路电压 U_{oc} 。
- (3) 计算等效电阻 R_0 。
- (4) 画出戴维南等效电路,接入待求支路求解。

【例 1-3】 如图 1-10(a) 所示,试用戴维南定理求 ab 支路电流 I 。

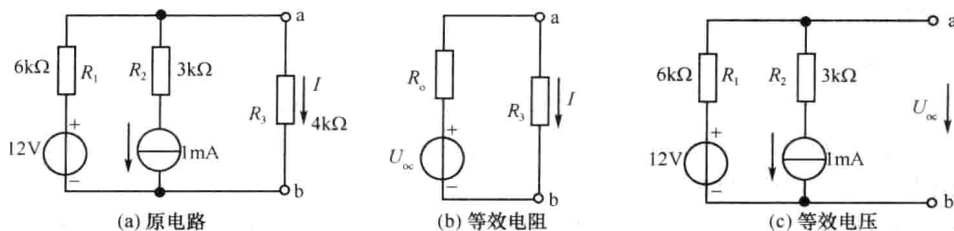


图 1-10 例 1-3 戴维南等效电路

解:用戴维南定理求解 ab 支路电流时,首先将 ab 支路以外的电路用戴维南定理等效代替,如图 1-10(b),然后计算其等效电压 U_{oc} 和等效电阻 R_0 。断开求解 ab 支路计算其等效电压 U_{oc} ,如图 1-10(c),即开路电压 U_{oc} 为:

$$U_{oc} = -1\text{mA} \times 6\text{k}\Omega + 12\text{V} = 6\text{V}$$

将图 1-10(c) 电压源短路、电流源断路,得其等效电阻 R_0 为:

$$R_0 = 6\text{k}\Omega$$

由闭合电路的欧姆定律:

$$I = \frac{U_{oc}}{R_0 + R_3} = \frac{6}{6 + 4} = 0.6(\text{mA})$$

3. 诺顿定理 诺顿定理:任何一个线性有源二端网络,如图 1-11(a) 所示,都可以用一个电流为 I_{sc} 的电流源、内阻为 R_0 的电阻并联组成的电源电路来等效代替,如图 1-11(b) 所示。等效电源的电流 I_{sc} 就是线性有源二端网络的短路电流,即 a、b 两端短路后其中的电流,等效电源的内阻 R_0 等于这个二端网络去除负载和电源(将理想电压源短路,使其电动势为零,将理想电流源开路,使其电流为零)后 a、b 两端之间的等效电阻,如图 1-11(c)、(d) 所示,在图中 I_{sc} 为短路电流, R_0 为诺顿等效电阻, N 为含独立电源的端口电路, N_0 为 N 去掉独立源之后所得到的电路。

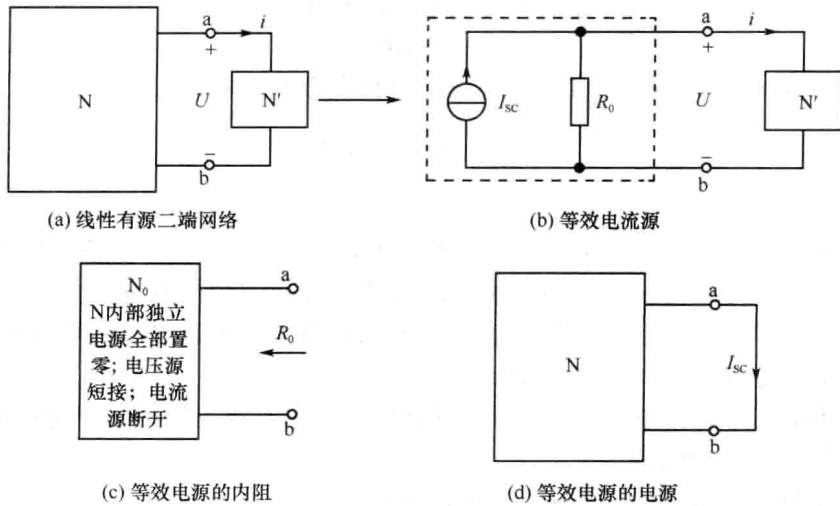


图 1-11 诺顿定理示意图

诺顿定理是将一个有源二端网络(电路)等效为电流源的定理. 如果要将一个有源二端网络等效为一个电流源,可先应用戴维南定理将其等效为电压源,然后应用电源的等效变换方法,将电压源变换为电流源即可.

这里的“等效”是指把二端网络变换为电流源后,不论是数值还是方向对外电路而言都应与变换之前相同.

要计算出等效电路,需:①在 ab 两端短路(亦即负载电阻为零)的状况下计算输出电流 I_{sc} . ②在 ab 两端开路(在没有任何往外电流输出,亦即当 ab 点之间的阻抗无限大)的状况下计算输出电压 U ,此时 R_0 等于 U 除以 I_{sc} . 也可以将原始电路系统中的独立电压源以短路取代、独立电流源以开路取代;或若电路系统中没有非独立电源,则 R_0 为移走所有独立电源后的电阻.

用诺顿等效电路求解时,其中的等效电阻 R_0 的求解方法与用戴维南定理的相同. 亦可以先求出戴维南等效电路,然后根据电压源与电阻串联组合与电流源和电阻的并联组合等效互换,求得诺顿等效电路.

【例 1-4】 电路如图 1-12(a) 所示,用诺顿定理求 I .

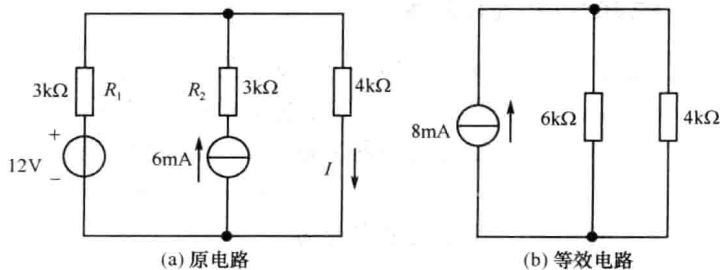


图 1-12 例 1-4 诺顿等效电路

解:1) 将 $4k\Omega$ 负载电阻短路,求 I_{sc}

$$I_{sc} = \frac{12}{6} + 6 = 8 \text{ (mA)}$$

2) 将 $4\text{k}\Omega$ 负载电阻开路、电流源开路、电压源短路, 求 R_0

$$R_0 = 6\text{k}\Omega$$

3) 画出等效电路如图 1-17(b) 所示, 求出 $4\text{k}\Omega$ 负载电阻中的电流.

$$I = \frac{6}{6+4} \times 8 = 4.8 (\text{mA})$$

注意:

(1) 诺顿定理只对外电路等效, 对内电路不等效. 也就是说, 不可应用该定理求出等效电源电动势和内阻之后, 又返回来求原电路(即有源二端网络内部电路)的电流和功率.

(2) 应用诺顿定理进行分析和计算时, 如果待求支路的有源二端网络仍为复杂电路, 可再次运用诺顿定理, 直至成为简单电路.

(3) 诺顿定理只适用于线性的有源二端网络. 如果有源二端网络中含有非线性元件时, 则不能应用诺顿定理求解.

戴维南定理和诺顿定理广泛应用于如下情况:

- 1) 只需求解网络中某一支路(或某一元件)的电压或电流.
- 2) 讨论某一支路元件参数变化对本支路电压电流的影响.
- 3) 负载从网络 N 获得最大功率问题.
- 4) 将一个复杂网络进行局部化简等问题.

要注意, 有时戴维南定理不能代替诺顿定理, 尽管对于一些含源一端口网络来说应用戴维南定理和诺顿定理都可以求解, 但是在有的一端口求解问题中, 戴维南定理不能代替诺顿定理, 同样诺顿定理也不能代替戴维南定理. 如有的一端口只存在诺顿等效电路不存在戴维南等效电路, 有的一端口只存在戴维南等效电路不存在诺顿等效电路, 在此, 不再赘述.

1.2 电路的暂态过程

前面讨论的是含电阻元件的电路在稳定状态(简称稳态)时的分析计算方法, 而实际电路中还包含电容元件和电感元件, 含有电容或电感元件的电路从一种稳态过渡到另一种稳态时, 电路中的电压、电流必然有一个渐变的过程, 这就是电路的暂态过程, 也称为过渡过程.

1.2.1 RC 电路的暂态过程

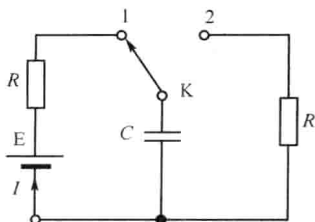


图 1-13 RC 电路充放电

如图 1-13 所示, 设开关 K 闭合前电容器上电压 $U_C = 0$, 当开关接通位置 1 时, 电源 E 通过电阻 R 向电容器 C 充电, 充电电流方向如图 1-13 所示, 由回路方程, 得

$$IR + U_C - E = 0 \quad (1-4)$$

所以充电电流为

$$I = \frac{E - U_C}{R} \quad (1-5)$$

在充电时间 $t = 0$ 的瞬间, 因为 $U_C = 0$, 所以, 此时 $I = E/R$ 为最大, 电容开始充电. 随着时间的推移, 电容上的电荷逐渐积累, U_C 相应上升, 使 $(E - U_C)/R$ 随 U_C 的上升而减小, 直至 U_C 上升到与电源电动势 E 相等, I 降至零, 充电过程结束.

可以证明, U_C 和 I 的变化规律均可用指数曲线表示, 即:

$$I = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \quad (1-6)$$

$$U_R = IR = E e^{-t/RC} \quad (1-7)$$

$$U_C = E - U_R = E(1 - e^{-t/RC}) \quad (1-8)$$

式(1-6)、式(1-7)、式(1-8)中 $e=2.7182$, t 表示充电的时间. 由此可见, 充电过程中的 U_C 和 I 都是随时间变化的.

当 $t=RC$ 时, 由式(1-6)和式(1-8)分别得

$$I = \frac{E}{R} e^{-1} = 0.37 \frac{E}{R}$$

$$U_C = E(1 - e^{-1}) = 0.63E$$

即充电电流降为最大值的 37%, 电容器两端电压增长到最大值的 63%. 把 RC 的乘积称为电路的时间常数(time constant), 以 τ 表示, 即

$$\tau = RC \quad (1-9)$$

式(1-9)中 R 的单位为欧姆(Ω), C 的单位是法拉(F), 则 τ 的单位为秒. 电容器充电的快慢可以用时间常数 τ 来衡量, τ 越大充电越慢, 如图 1-14 所示, 当 $t=3RC$ 时, $U_C = E(1 - e^{-3}) = 0.95E$.

图 1-15 表示充电电流随时间变化的关系. 如图可知, 当 $t=(3\sim4)RC$ 时, 充电过程基本结束.

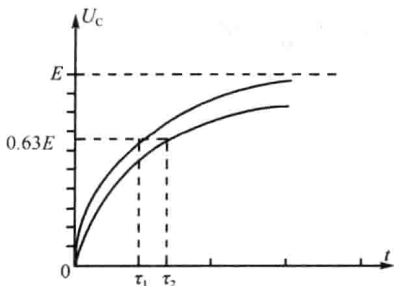


图 1-14 RC 充电时电压变化曲线

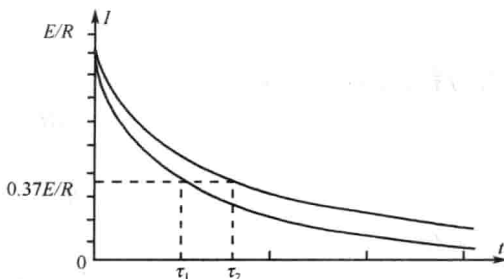


图 1-15 RC 电路充电时充电电流变化曲线

如图 1-13 所示, 电容器充电结束后, 它的电势差达到最大值. 此时若把开关由位置 1 扳到位置 2, 电容器将通过电阻放电, 放电时的回路方程为 $U_C - IR = 0$, 则

$$U_C = IR, I = U_C/R$$

由此可见, RC 电路放电过程中的 U_C 、 I 和 U_R 变化规律完全相同. 当开关接通位置 2 的瞬间, 即 $t=0$ 时, 电容器极板上电荷刚开始释放, 所以 $U_C = E$, 放电电流 $I = U_C/R = E/R$, 可见, 这瞬间的 U_C 、 I 都为最大值. 随着时间的推移, 电容放电, 使 U_C 逐渐下降. 因而放电电流 I 也逐渐减小, 直到 U_C 下降到零, 放电电流降至零, 放电过程结束.

RC 电路放电过程中的 U_C 和 I 的变化规律, 可由下面的两个式子表示:

$$U_C = E e^{-t/RC} \quad (1-10)$$

$$I = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \quad (1-11)$$

由式(1-10)、式(1-11)可知, 在 RC 放电过程中, U_C 和 I 都从它们各自的最大值按指数规律衰减至零, 如图 1-16, 图 1-17 所示, 衰减的快慢决定于放电回路的时间常数 $\tau = RC$.

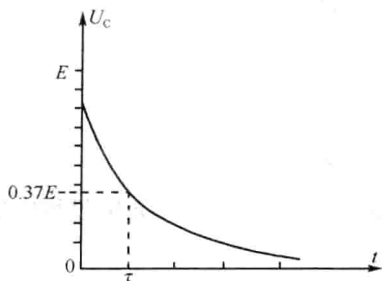


图 1-16 RC 放电电压变化曲线

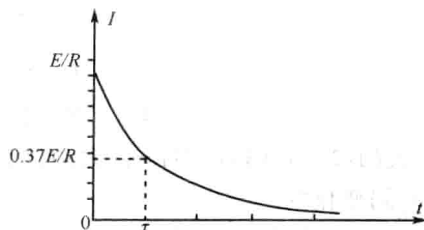


图 1-17 RC 放电电流变化曲线

1.2.2 RL 电路的暂态过程

电感 L 与电阻 R 组成的 RL 电路, 在零突变到恒定值 U ; 或恒定值 U 突变到零的阶跃电压作用下, 电路中的电流从开始发生变化起逐渐趋于稳定. 这种在阶跃电压作用下, 电流从开始发生变化起逐渐趋于稳定的过程叫暂态过程.

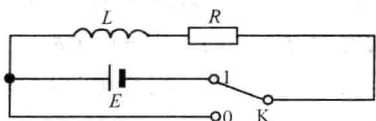


图 1-18 RL 电路

如图 1-18 所示为 RL 电路. 其中 E 为电源电动势, 自感系数 L 很大的线圈与电阻 R 串联, 当单刀双掷开关 K 扳向 1 时, 电路接通, 闭合回路有电流通过. 设电流强度为 I , 根据基尔霍夫定律得微分方程:

$$E - L \frac{dI}{dt} = IR$$

解微分方程, 分离变量后

$$\frac{dI}{\frac{E}{R} - I} = \frac{R}{L} dt$$

两边积分得

$$\ln\left(\frac{E}{R} - I\right) = -\frac{R}{L}t + C$$

式中, C 为积分常数. 当 K 刚闭合瞬间, $t=0, I=0$, 得 $C = \ln(E/R)$, 代入上式得

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (1-12)$$

可见, 由于自感现象, 电路中的电流不能立刻由零突变到恒定值, 其电流的增长规律为式(1-12)所示. 在式(1-12)中, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $I \rightarrow E/R = I_0$, 即最后电流达到稳定值. 这同回路中无自感时电源所供给电流相同. 并且, 电流增长的快慢由 R 和 L 的数值决定, RL 电路的时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$, 也称弛豫时间. 当 $t = \tau$ 时, 电流 I 将增长到最大值的 63.2%, 将 $t = 5\tau$ 代入式(1-12), 得 $I = 0.994 I_0$, 这意味着经过 5τ 的时间暂态过程已基本结束. RL 电路中电流增长的规律如图 1-19 所示.

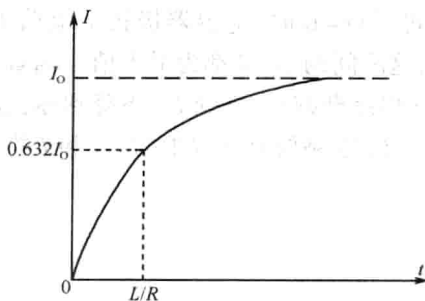


图 1-19 自感电路中电流的增长

当电流达到稳定值 $I_0 = E/R$ 后,将开关 K 扳向 0,由基尔霍夫定律可得

$$-L \frac{dI}{dt} = IR$$

即

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt$$

两边积分后得

$$\ln I = -\frac{R}{L} dt + C$$

由物理条件 $t=0$ 时, $I=E/R$,得 $C=\ln(E/R)$,代入上式整理后

$$I = \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1-13)$$

从式(1-13)可知,外电源撤掉后,由于电感线圈中自感电动势的作用总是阻碍原来电流的变化,电流不能立刻衰减到零,而是逐渐地慢慢地减小到零,衰减的快慢由 R 和 L 的数值决定.当 $t=\tau$ 时,电流衰减到最大值的 $1/e$ 倍,即为最大值的 36.8%. RL 电路中电流衰减的规律如图 1-20 所示.

注意:含有储能元件的电路,当从一种稳定状态变为另一种稳定状态时,由于能量不能跃变,必然经历一个暂态过程.在换路瞬间($t=0$),电感元件中的电流和电容元件两端电压不能跃变;暂态过程中电压、电流变化的快慢由时间常数来表征. τ 越小,暂态过程进行得越快.工程上认为,当 $t=(4\sim 5)\tau$ 时,暂态过程结束.

在实际供电线路中,在切断自感系数很大,电流很强的电路的瞬间,产生很高的自感电动势,形成电弧,电弧不仅能够烧坏电器,也会引起火灾,在这类电路中应采用特制的开关;精密电阻可采用双绕并绕来消除自感现象.

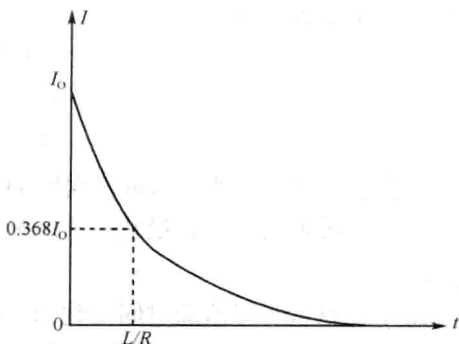


图 1-20 自感电路中电流的衰减

1.3 正弦交流电路

目前,电力系统中所用的电压、电流几乎都采用正弦函数形式表示,其中大多数问题都可以按正弦电流电路来分析.与直流电相比,正弦交流电在生产、输送和应用上有不少优点,而且正弦交流电变化平滑,不易产生高次谐波,这有利于保护电器设备的绝缘性能和减少电器设备运行中的能量损耗.另外,各种非正弦交流电都可由不同频率的正弦交流电叠加而成,因此正弦交流电在工业中得到广泛的应用.

正弦交流电是指电路中的电源随时间按正弦规律作周期性变化,由它引起的电路中的电压与电流也都随时间按正弦规律作周期性变化.在工农业生产上以及人们日常生活中所用的电大多数都是正弦交流电.正弦交流电的应用极为广泛.下面介绍常见的正弦交流电的一些基本知识.